
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Уральский государственный университет им. А.М. Горького»

ИОНЦ «Нанотехнологии»

Физический факультет

Кафедра компьютерной физики

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

Глоссарий

Руководитель ИОНЦ «Нанотехнологии»

_____ Черепанов В.А.

_____ Дата

**Екатеринбург
2008**

НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ (ГЛОССАРИЙ)

*Блоховские осцил-
ляции*

Bloch oscillations

Периодическое движение зонных носителей заряда в идеальном периодическом потенциале решетки при приложении электрического поля, обусловленное периодической зависимостью энергии от квазиимпульса. В реальных решетках из-за рассеяния на дефектах блоховские осцилляции не могут наблюдаться. Более благоприятны условия для реализации Болховского генератора в полупроводниковых сверхрешетках.

*Бора-Зоммерфельда
формула*

*Bohr-Sommerfeld
rule*

Квазиклассическое правило квантования компонент импульса (квазиимпульса), аналогичное классическому методу вычисления спектра мод в волновых резонаторах. При известном потенциале и законе дисперсии определяет энергетическое положение уровней размерного квантования.

Боровский радиус
Bohr radius

Соответствующий нижайшему энергетическому уровню радиус электронной орбиты в атоме водорода в модели Бора.

*Боровский радиус
эффективный*
Effective Bohr radius

Радиус связанного водородоподобного состояния зонных носителей на заряженном центре, соответствующий нижайшему энергетическому уровню. В полупроводниках с малой эффективной массой носителей и при типичных значениях диэлектриче-

ской проницаемости в сотни раз больше боровского радиуса в атоме водорода. Отсюда ясно, что масштаб длин, соответствующих проявлению квантовых свойств частиц, от характерной для атомов величины 0,05 нм сдвигается в полупроводниках в область единиц и десятков нм, вполне доступных для современных нанотехнологий.

Встроенное поле
Built-in field

Электрическое поле, возникающее в условиях термодинамического равновесия в гетеро- или гомопереходе с неравной нулю контактной разностью потенциалов.

Вырожденный газ
degenerate gas

Газ высокой плотности, в котором распределение частиц газа лимитировано квантовомеханическим принципом тождественности частиц (принципом Паули для фермионов). Заполнение состояний такого газа описывается распределением Ферми. В полупроводниковых структурах вырождение имеет место в тех областях, где уровень Ферми расположен в разрешенной зоне и отделен от ее дна энергетическим расстоянием, превышающим тепловую энергию.

Динамическая эффективная масса
Kinetics (motional)
effective mass

Параметр размерности массы в формуле, выражающий скорость частицы с непараболическим законом дисперсии через ее импульс в виде, аналогичном соотношению между этими величинами для стандартного (квадратичного) дисперсионного соотношения. Зависит от закона дисперсии и раз-

мерности пространства.

Длина экранирования

Screening length

Параметр размерности длины, характеризующий глубину проникновения внешнего электрического поля в системе носителей заряда. При экранировании кулоновского поля - радиус экранирования.

Длина свободного пробега

Mean free path

Среднее расстояние, проходимое носителем заряда между последовательными актами рассеяния на дефектах.

Дебая-Хюккеля длина

Debye-Hukkel lenght

Длина линейного экранирования в невырожденном d -мерном газе носителей заряда.

Де Бройля длина волны

De Broglie wavelength

Длина волны $l = h/p$, сопоставляемая в волновой механике частице с импульсом p (h – постоянная Планка).

Диамангнитный сдвиг

Diamagnetic shift

Сдвиг уровней и подзон размерного квантования в двумерном газе носителей в наклонном или параллельном двумерному слою магнитном поле.

Закон дисперсии

Dispersion relation

Зависимость кинетической энергии зонных носителей от их квазиимпульса.

Зеемановское расщепление

Zeeman splitting

Спиновое расщепление энергетических уровней в магнитном поле. В трехмерном электронном газе отношение орбитального расщепления (уровни Ландау) к зеемановскому величина постоянная. В

двумерной системе в наклонном магнитном поле циклотронное расщепление определяется только нормальной к двумерной плоскости компонентой магнитного поля, что позволяет управлять структурой расщепленных по спину уровней Ландау, вплоть до изменения порядка их следования.

Инверсионный слой
Inversion layer

Приповерхностная область полупроводника МДП-структуры, в которой концентрация неосновных (по отношению к объему полупроводника) носителей превышает концентрацию заряженных примесей. Инверсионный слой отделен от квазинейтральной области полупроводника слоем обеднения.

Интерфейс
Interface

Граница между двумя материалами.

Квазиклассическое приближение
Quasiclassical approximation
(WKB method)

Приближенный метод решения уравнения Шредингера. Определение собственных значений энергии при таком подходе сводится к вычислению определенных интегралов, что несравнимо проще задачи нахождения собственных функций и собственных значений исходного уравнения. Точность метода $1/\pi^2 i^2$ падает с уменьшением номера уровня, однако вполне разумна даже для основного состояния. В ряде важных случаев квазиклассические решения совпадают с точными.

Квазинейтральная область
Quasi-neutral region

Области полупроводниковых гетероструктур, настолько удаленные от гетеропереходов, что объемные концентрации зонных носителей заряда в них

<p><i>Квант магнитного потока</i></p> <p><i>Magnetic-flux quantum</i></p>	<p>можно считать равными концентрациям заряженных примесей.</p> <p>Имеющая размерность магнитного потока комбинация мировых констант (отношение произведения скорости света на постоянную Планка к заряду электрона $\Phi_0 = ch/e$). С каждым состоянием заряженной частицы двумерной системы в магнитном поле H связан магнитный поток, равный Φ_0. Это определяет кратность вырождения уровней Ландау $n_H = eH/ch$.</p>
<p><i>Квант проводимости</i></p> <p><i>Conductance quantum</i></p>	<p>Имеющая размерность проводимости комбинация мировых констант (отношение удвоенного квадрата заряда электрона к постоянной Планка) $G_0 = 2e^2/h$. В таких единицах квантуется кондактанс квантовых нитей в баллистическом режиме и холловская компонента двумерного кондактанса в квантовом эффекте Холла.</p>
<p><i>Квантовая нить (проволока)</i></p> <p><i>Quantum wire</i></p>	<p>Наноструктура с одномерным электронным газом, в которой движение носителей пространственно ограничено по двум степеням свободы (двумерная квантовая яма).</p>
<p><i>Квантовая плоскость</i></p> <p><i>Quantum plane</i></p>	<p>Наноструктура, в которой движение носителей ограничено по всем пространственным степеням свободы. Локализованные в такой трехмерной квантовой яме носители образуют «нульмерный» газ с полностью дискретным спектром, подобно атомному спектру. В отличие от естественных атомов,</p>

локализация электронов (дырок) в таком искусственном атоме обусловлена не кулоновским притяжением к ядру, а отталкиванием от потенциальных барьеров на границах квантовой ямы.

Квантовая точка
Quantum dot

Наноструктура, в которой движение носителей ограничено по всем пространственным степеням свободы. Локализованные в такой трехмерной квантовой яме носители образуют «нульмерный» газ с полностью дискретным спектром, подобно атомному спектру. В отличие от естественных атомов, локализация электронов (дырок) в таком искусственном атоме обусловлена не кулоновским притяжением к ядру, а отталкиванием от потенциальных барьеров на границах квантовой ямы.

Квантовая яма
Quantum well

Потенциальная яма в полупроводниковых структурах, размеры которой меньше или сравнимы с длиной волны де Бройля локализованного в ней носителя заряда. В результате спектр носителя в яме квантуется и становится дискретным.

Квантовый эффект
Холла (дробный)
Quantum Hall effect
(fractional)

Эффект Холла в высокоподвижном двумерном электронном газе в квантующих магнитных полях и при низких температурах, заключающийся в квантовании холловской компоненты кондактанса в дробных единицах G_0 ($G = pG_0 / q$, где p, q – целые числа). Наиболее выражен при нечетных значениях знаменателя дроби. В отличие от целочисленного квантового эффекта Холла, находящего объяснение

в рамках одноэлектронной модели, обусловлен эффектами межэлектронного взаимодействия.

*Квантовый эффект
Холла (целочислен-
ный)
Quantum Hall effect
(integer)*

Эффект Холла в двумерном электронном газе в квантующих магнитных полях и при низких температурах, заключающийся в квантовании холловской компоненты кондактанса в единицах $e^2/h G_0$ ($G = e^2/h = iG_0/2$, где i – целое число)

*Кондактанс
Conductance*

Отношение приложенной к проводящей системе разности потенциалов к протекающему через нее току. В отличие от удельной проводимости, является характеристикой конкретного образца в целом. В квантовых нитях в режиме баллистического переноса квантуется в единицах $2e^2/h$.

*Контактная раз-
ность потенциалов
Contact potential*

Разность потенциалов, возникающая при контакте двух материалов в гомо или гетероструктурах. Равна разности работ выхода образующих гетеропереход материалов.

*Конфайнмент
Confinement*

Термин (заимствован из хромодинамики), широко используемый физике полупроводниковых наноструктур и аналогичный понятию пространственного ограничения.

*Конфайнмент ки-
нетический
Kinetic confinement*

Эффект релятивистского типа в наноструктурах с непараболическим законом дисперсии (или с разрывом величины эффективных масс при интерфейсах), заключающийся в образовании потенциальной ямы, не имеющей связанного состояния для покоящейся частицы, локализованных состояний при

	квазиимпульсах, превышающих его некоторое критическое значение (зависящее от ограничивающего потенциала). Подзонные законы дисперсии в этом режиме обрываются со стороны малых квазиимпульсов.
<i>Композиционная квантовая яма</i>	Потенциальная яма в полупроводниковых трехслойных наноструктурах, носители в среднем слое которой отделены от соседних областей близким к прямоугольному барьером, высота которого равна разрыву соответствующих зон на гетерограницах.
<i>Краевые состояния Edge states</i>	Энергетические состояния, соответствующие скачущим траекториям носителей заряда двумерной системы вблизи ее границ в квантующем магнитном поле. В отличие от вырожденных по положению центров осцилляторов дискретных состояний в магнитном поле, соответствующих удаленным от границ орбитам (уровни Ландау), энергия краевых состояний непрерывно возрастает по мере приближения центра циклотронной орбиты к границе. В результате, вблизи границ энергетический спектр в магнитном поле становится непрерывным. Краевые состояния играют важную роль в объяснении квантового эффекта Холла.
<i>Кратность вырождения уровней Ландау Degeneracy factor</i>	Число состояний, относящихся к одному уровню Ландау. Однозначно определяется величиной магнитного поля.
<i>Ландау уровни Landau levels</i>	Уровни орбитального квантования спектра свободных носителей заряда двумерной системы в маг-

	<p>нитном поле, обусловленного финитным характером их движения (циклотронное движение). В трехмерной системе, где носители могут иметь произвольную компоненту квазиимпульса вдоль магнитного поля, правильнее говорить о (одномерных) подзонах Ландау.</p>
<p><i>Ландауэра формула</i> <i>Landauer formula</i></p>	<p>Формула для кондактанса квантовой нити, связывающая его с квантом проводимости G_0, коэффициентом прохождения T и числом одномерных подзон в нити i $G_{ID} = iG_0T$</p>
<p><i>Магнитная длина</i> <i>Magnetic length</i></p>	<p>Параметр, характеризующий размеры области локализации волновой функции электрона в магнитном поле. Зависит только от магнитного поля.</p>
<p><i>МДП-структура</i> <i>MIS (MOS) structure</i></p>	<p>Структура металл-диэлектрик-полупроводник. Глубиной квантовой ямы в приповерхностной области полупроводника и концентрацией носителей в такой структуре можно в широких пределах управлять, изменяя напряжение на полевом (металлическом) электроде.</p>
<p><i>Наклонное магнитное поле</i> <i>Tilted magnetic field</i></p>	<p>Магнитное поле, направленное под углом к слою с двумерным электронным газом. Орбитальное квантование (структура уровней Ландау) при такой ориентации поля определяется только перпендикулярной компонентой поля, тогда как параллельная компонента приводит к небольшому (зависящему от толщины двумерного слоя) диамагнитному сдвигу. Для идеального двумерного газа (с дельта-образной волновой функцией в направлении конфайнмента) параллельная компонента не влияет на орбитальное движение, однако дает вклад в зеема-</p>

	новское (спиновое) расщепление, определяемое полным магнитным полем.
<i>Невырожденный газ</i> <i>Non-degenerate gas</i>	Газ малой плотности, в котором можно пренебречь влиянием квантовомеханического принципа тождественности частиц. В случае фермионного газа это соответствует слабому влиянию принципа Паули на распределение частиц газа по состояниям и газ с хорошей точностью сможет быть описан классической статистикой Больцмана. В полупроводниковых структурах классической статистике подчиняются зонные носители в областях, где уровень Ферми расположен в запрещенной зоне и отделен от ее дна энергетическим расстоянием, превышающим тепловую энергию.
<i>Обедненный слой</i> <i>Depletion layer (region)</i>	Область вблизи p - n перехода в гетероструктурах или в МДП-структурах, в которой концентрация свободных носителей мала по сравнению с концентрацией заряженных примесей.
<i>Обогащенный слой</i> <i>accumulation layer</i>	Приповерхностная область полупроводника, образующаяся при приложении электрического поля, притягивающего к поверхности основные носители заряда.
<i>Параболическая потенциальная яма</i> <i>Parabolic quantum well</i>	Потенциал гармонического осциллятора. Потенциальная яма, аппроксимирующая ограничивающий потенциал в дельта-легированных слоях. Эффективный потенциал частицы в магнитном поле. Для квадратичного закона дисперсии локализованных в такой яме частиц их энергетический спектр – сетка эквидистантных уровней.

<i>Плоские зоны</i> <i>Flat band</i>	Энергетическая диаграмма структуры, соответствующая независящему от координат положению энергетических уровней. Условием режима плоских зон в системе или ее части является отсутствие зарядов.
<i>Плотность состояний</i> <i>Density of states</i>	Число энергетических состояний в системе размерности d , приходящихся на единичный интервал энергии в расчете на единицу d -мерного объема. Определяется энергетическим спектром системы (для подзон размерного квантования их законом дисперсии).
<i>Подзона размерного квантования</i> <i>Subband (of size quantization)</i>	Совокупность энергетических состояний в одномерном или двумерном газе носителей, принадлежащих одному уровню размерного квантования и отличающихся величиной и направлением квазиимпульса.
<i>Подвижность</i> <i>Mobility</i>	Отношение дрейфовой скорости носителей к электрическому полю.
<i>Клитцинга постоянная</i> <i>von Klitzing constant</i>	Новая единица в метрологии h/e^2 , равная удвоенной величине, обратной кванту проводимости и служащая эталоном сопротивления (25812, 807 Ом).
<i>Приближение полного истощения</i> <i>Full depletion approximation</i>	Общепринятая модель p - n гетероперехода, упрощающая расчет пространственного распределения встроенного электрического поля и потенциала. Предполагает, что область вблизи перехода не содержит свободных носителей с резким переходом к

<i>Приповерхностная квантовая яма Surface quantum well</i>	соседним квазинейтральным областям. Самосогласованная потенциальная яма, образующаяся в приповерхностной области полупроводника при приложении к нему внешнего электрического поля (например, при подаче напряжения на полевой электрод полевого транзистора), если размеры ямы близки или сравнимы с длиной волны де Бройля.
<i>Пуассона уравнение Poisson equation</i>	Дифференциальное уравнение второго порядка, связывающее электрический (или химический) потенциал с объемной плотностью заряда. Основное уравнение, определяющее самосогласованный потенциал в гетероструктурах, как при квазиклассическом, так и при квантовом рассмотрении.
<i>Работа выхода Work function</i>	Энергия, которую необходимо сообщить носителю заряда с энергией, совпадающей с уровнем Ферми, чтобы удалить его из кристалла. В полупроводниках, в отличие от электронного сродства, зависит от легирования (в невырожденных полупроводниках носит формальный характер).
<i>Размерное квантование Size quantization</i>	Квантование спектра зонных носителей при их пространственном ограничении в полупроводниковых гетероструктурах. Существенно, когда масштаб пространственного ограничения порядка или меньше длины волны де Бройля, что обычно приходится на интервал от нескольких до десятков нанометров.
<i>Разрыв зон</i>	Разница в энергетическом положении зон на ин-

<i>Bands discontinuity</i>	терфейсе гетероперехода, возникающая за счет разности электронного сродства контактирующих материалов.
<i>Рашибы эффект</i> <i>Rashba effect</i>	Обусловленное спин-орбитальным взаимодействием снятие электрическим полем ограничивающего потенциала спинового вырождения спектра зонных носителей в асимметричных квантовых ямах полупроводниковых наноструктур. Наиболее ярко проявляется в квантовых полупроводниках с малой шириной запрещенной зоны и сильным спин-орбитальным взаимодействием. Открытие эффекта стимулировало формирование нового направления в электронике - спинтроники, основанной на управлении электрическим полем спиновой степени свободы зонных носителей, подобно управлению их орбитальным движением в полевом транзисторе.
<i>Скачущие траектории</i> <i>Skipping orbits</i>	Квазиклассические траектории, соответствующие движению носителя заряда в магнитном поле с центрами циклотронной орбиты, удаленными от границ образца на расстояние, меньшее циклотронного радиуса. В результате столкновений с границами, носители в этих состояниях дрейфуют (в отсутствие электрического поля) вдоль границ образца, описывая замкнутую траекторию.
<i>Скорость дрейфа I</i> <i>Drift velocity</i>	Скорость дрейфа (между актами рассеяния) ведущего центра циклотронной орбиты носителей заряда вдоль эквипотенциальной линии в скрещен-

ных электрическом и магнитном полях.

Скорость дрейфа 2
Drift velocity

Среднее приращение скорости носителей заряда при его движении в электрическом поле на участке траектории между актами рассеяния.

Соотношение Эйнштейна
Einstein relation

Соотношение, связывающее подвижность и коэффициент диффузии. Зависит от размерности системы, закона дисперсии и степени вырождения

Сопротивление
(резистанс)
resistance

Отношение тока в проводящей системе к приложенной разности потенциалов. В отличие от удельного сопротивления, является характеристикой конкретного образца в целом. В квантовых нитях в режиме баллистического переноса квантуется в единицах $h/2e^2$.

Томаса-Ферми длина
Tohmas-Fermi length

Длина линейного экранирования в вырожденном d -мерном газе носителей заряда.

Уровень размерного квантования
Size quantization energy level

Энергетический уровень в потенциальной яме, образующийся при пространственном ограничении движения носителя заряда в наноструктурах. В системах с непараболическим спектром – дно подзоны размерного квантования.

Удельная проводимость
Conductivity

Локальная характеристика проводящих электрический ток систем, равная отношению плотности тока к приложенному электрическому полю. В магнит-

ном поле и в анизотропных средах является тензором.

*Фактор заполнения
(уровней Ландау)
Filling factor*

Отношение числа носителей заряда в двумерной системе к числу состояний на одном уровне Ландау.

*Фермиевская длина
(волны)
Fermi length*

Длина волны де Бройля, соответствующая фермиевскому квазиимпульсу p_F вырожденного газа носителей $l_F = \hbar/p_F$.

*Ферми поверхность
Fermi surface*

Изоэнергетическая поверхность в пространстве квазиимпульсов, соответствующая энергии Ферми $E(p) = E_F$ и отделяющая заполненные состояния от пустых в системах с вырожденным электронным газом. В двумерном случае поверхность Ферми вырождается в линию Ферми, в одномерном в две точки.

*Циклотронная эффективная масса
Cyclotron effective mass*

Параметр размерности массы фигурирующий в формуле для циклотронной частоты носителей с неквадратичным законом дисперсии, записанной в виде, аналогичном случаю свободного электрона. Зависит как от закона дисперсии и размерности пространства. В случае двумерной (и только) при любом законе дисперсии системы совпадает с эффективной массой плотности состояний.

Химический потенциал (химпотенциал)

Chemical potential

В полупроводниках в условиях термодинамического равновесия - энергетическое расстояние от дна зоны проводимости E_c до уровня Ферми F (разность $F - E_c$). Определяет распределение зонных носителей по зонным и примесным состояниям (концентрации носителей и заряженных примесей). В неоднородных системах и во внешних полях является функцией координаты. в вырожденных полупроводниках и металлах при $T=0$ эквивалентен энергии Ферми.

Электрический квантовый предел
Electric quantum limit

Соответствует таким параметрам электростатического потенциала квантовой ямы, при которых заполнена только одна подзона размерного квантования (по аналогии с магнитным квантовым пределом, соответствующим заполнению одного уровня Ландау). В этих условиях электронный газ в двумерных (одномерных) подзонах наиболее близок к идеальному двумерному (одномерному) газу.

Электронное сродство
Electron affinity

Энергия, которую необходимо сообщить электрону на дне зоны проводимости (т.е. с нулевой кинетической энергией), чтобы удалить его из кристалла.

Энергия Ферми (электрохимический потенциал)
Fermi energy
(electrochemical potential, diffusion po-

Термодинамический потенциал, определяемый как изменение энергии системы в расчете на одну частицу при ее добавлении к системе. Равен сумме электрического и химического потенциалов. В условиях термодинамического равновесия одинаков во всех областях системы, откуда следует, что из-

tential)

менение электрического потенциала во внешних или встроенных полях приводит к такому же, но обратному по знаку изменению химпотенциала.

*Энергия Ферми
Fermi energy*

В металлах и вырожденных полупроводниках энергия Ферми соответствует граничной энергии в разрешенной зоне, отделяющей при $T=0$ состояния, заполненные носителями, от незанятых, т.е. максимальной энергии носителей.

*Эффективная масса
плотности состояний
Effective mass for
density of states*

Параметр размерности массы в формуле, выражающий зависимость плотности состояний от энергии $D(E)$ в электронном газе с непараболическим законом дисперсии в виде, аналогичном такому соотношению для стандартного (квадратичного) дисперсионного соотношения. Отличие реальной зависимости $D(E)$ от стандартной переносится при такой записи на эффективную массу, которая, таким образом, является теперь функцией энергии. Зависит как от закона дисперсии, так и размерности пространства.